Podstawy Automatyki

Politechnika Poznańska Instytut Automatyki i Robotyki

ĆWICZENIE 4

Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych

Ćwiczenie ma na celu przedstawienie praktycznych metod wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych elementów dynamicznych.

1 Wprowadzenie

Jedną z podstawowych metod określania właściwości układów dynamicznych jest wyznaczanie ich charakterystyk częstotliwościowych. Charakterystyka częstotliwościowa opisuje odpowiedź układu na wymuszenie harmoniczne (sinusoidalne) o częstotliwości zmieniającej się w określonym zakresie (charakter fizyczny sygnału wejściowego i wyjściowego może być różny). Sygnał harmoniczny jest szczególnie przydatny jako sygnał testowy ponieważ kolejne punkty charakterystyki wyznaczane są oddzielnie, za każdym razem używając pełnej dopuszczalnej ze względu na nieliniowość amplitudy sygnału pomiarowego – wpływ zakłóceń jest zatem mniejszy niż przy metodach czasowych.

Zastosowanie charakterystyk częstotliwościowych

- Projektowanie układów regulacji
- Modelowanie obiektu
- Dobór częstotliwości próbkowania sygnału wyjściowego w układach dyskretnych

Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych polega na znalezieniu zależności między amplitudami i fazami sygnałów wejściowego i wyjściowego w stanie ustalonym, gdy na wejście doprowadzony jest pomiarowy sygnał sinusoidalny o stałej amplitudzie i częstotliwości. Dokonanie tego rodzaju pomiarów przy różnych częstotliwościach pozwala znaleźć kolejne punkty charakterystyki; jeśli dokonamy tego w odpowiednim paśmie częstotliwości (teoretycznie w paśmie od f = 0 do $f = \infty$), otrzymana charakterystyka w pełni scharakteryzuje własności obiektu.

Do wykonania pomiarów konieczne jest użycie generatora przebiegów sinusoidalnych (najczęściej generatora sygnału elektrycznego) o regulowanej częstotliwości i amplitudzie sygnału. Sygnał wejściowy i wyjściowy obiektu należy podłączyć do urządzenia rejestrującego (oscyloskop, karta przetworników A/C, rejestrator pisakowy itp.) i na podstawie zarejestrowanych oscylogramów wyznaczyć stosunek amplitud $|G(j\omega)| - \text{wzór } (1)$ i przesunięcie fazowe arg $G(j\omega)$ - wzór (2) przy danej częstotliwości (rys 1).

$$|G(j\omega)| = M(\omega) = \frac{2A_2}{2A_1} \tag{1}$$

$$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega) = -2\pi \frac{T_x}{T}$$
⁽²⁾



Rysunek 1: Wyznaczanie modułu i przesunięcia fazowego na podstawie oscylogramów

2 Układy pomiarowe do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

W najprostszym przypadku gdy mamy do czynienia z obiektem małej mocy o wejściu i wyjściu w postaci sygnału napięciowego układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych przedstawiony został na rys 2:



Rysunek 2: Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

W praktyce sygnał z generatora sygnału elektrycznego ma zbyt małą moc żeby można go było podłączyć bezpośrednio do wejścia badanego obiektu. Konieczne jest jego wzmocnienie w elemencie wykonawczym, który dodatkowo zamienia sygnał napięciowy na inną, wymaganą do sterowania badanym obiektem wielkość np. na siłę, przemieszczenie, ciśnienie, przepływ itp. Dodatkowo sygnał wyjściowy z obiektu nie zawsze jest napięciowy; należy wówczas zastosować odpowiedni przetwornik pomiarowy (zakładamy że jego wpływ na wyniki pomiarów jest pomijalny). Ponieważ element wykonawczy jest połączony szeregowo z obiektem, zwykle wyznacza się wypadkową charakterystykę częstotliwościową tych elementów – rys 3.

Na rys 4 przedstawiono schemat blokowy układu do wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych obiektu pracującego w układzie zamkniętym z regulatorem liniowym. W tym



Rysunek 3: Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych obiektu z urządzeniem wykonawczym na wejściu

przypadku generator działa na obiekt za pośrednictwem regulatora, który sterując poprzez urządzenie wykonawcze obiektem, wymusza na jego wyjściu sygnał zadany czyli przebieg sinusoidalny. W tym przypadku amplituda sygnału wyjściowego będzie miała stałą wartość, niezależną od częstotliwości sygnału z generatora. Zależna od częstotliwości będzie wartość sygnału na wejściu obiektu



Rysunek 4: Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych obiektu w układzie zamkniętym z liniowym regulatorem

Układ ten nadaje się do badania obiektów **astatycznych**, które całkują sygnał wejściowy. W przypadku układu pomiarowego z rys. 3 składowa stała w sygnale na wejściu spowoduje ciągłe narastanie (lub opadanie) sygnału wyjściowego co uniemożliwia poprawny odczyt amplitudy oscylacji i przesunięcia fazowego. Dodatkowo może dojść do przekroczenia dopuszczalnych wartości sygnału wyjściowego lub innych sygnałów i w szczególności do uszkodzenia urządzenia. Układ pomiarowy z regulatorem odtwarza na wyjściu obiektu składową stałą sygnału z generatora: sygnał wyjściowy oscyluje wokół ustalonej wartości.

3 Praktyczne problemy pojawiające się podczas wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

3.1 Dobór amplitudy sygnału wejściowego

Przy doborze amplitudy sygnału pomiarowego należy przede wszystkim zwrócić uwagą na nieliniowości występujące w układzie. Z doświadczenia wiemy że w otaczającym nas świecie zdecydowana większość zmiennych fizycznych nie może przyjmować dowolnie dużych wartości. Dlatego w każdym rzeczywistym obiekcie może pojawić się nieliniowość związana z nasyceniem sygnałów (Dodatek 1).

Często celowo wprowadza się nasycenie sygnału wejściowego lub innych sygnałów w obiekcie, w celu zabezpieczenia urządzenia przed uszkodzeniem (np. ograniczenie maksymalnego prądu płynącego przez uzwojenie silnika), czy też dla bezpieczeństwa obsługi (np. ograniczenie maksymalnej prędkości samochodu).

UWAGA:

W trakcie wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej należy tak dobrać amplitudę sygnału wejściowego, aby żaden z sygnałów w badanym obiekcie nie uległ nasyceniu.

Zgrubnej oceny czy któryś z sygnałów uległ nasyceniu można dokonać na podstawie obserwacji kształtu sygnału wyjściowego. Przykładowo jeśli nasycenie pojawia się bezpośrednio na wyjściu obiektu to można je zobaczyć na oscylogramie (Dodatek 1/rys. 9 b). W pewnych sytuacjach nasyceniu może ulec któryś z sygnałów 'wewnątrz' obiektu. Jeżeli sygnały te są niedostępne dla pomiarów wówczas o ewentualnym wystąpieniu nasycenia można wnioskować na podstawie obserwacji kształtu sygnału wyjściowego; wymaga to jednak analizy częstotliwościowej tego sygnału. Jeżeli w widmie pojawią się dodatkowe prążki o częstotliwościach będących całkowitymi wielokrotnościami częstotliwości sygnału wejściowego to oznacza, że któryś z sygnałów ulega nasyceniu. W takim przypadku należy zmniejszyć amplitudę sygnału wejściowego.

3.2 Zakres zmian częstotliwości sygnału wejściowego

Pewną trudność sprawia zazwyczaj określenie pasma częstotliwości, w którym trzeba dokonać pomiarów. Niekiedy zaleca się rozpoczynać pomiary od doświadczalnego wyznaczenia częstotliwości $f_{-\Pi}$, przy której przesunięcie fazowe $\varphi = -\Pi$. Następnie przeprowadza się pomiary dla częstotliwości z zakresu od 0 do $2f_{-\Pi}$.

3.3 Dobór składowej stałej sygnału wejściowego

W wielu przypadkach sygnał sterujący nie może przyjmować wartości ujemnych (np. nie można dostarczyć ujemnej mocy do grzałki, zaworu ustawionego w zerowej pozycji nie da się bardziej zamknąć itp.). Wówczas do sinusoidalnego sygnału wymuszenia należy dodać składową stałą, o wartości odpowiadającej typowemu punktowi pracy urządzenia (lub w połowie zakresu liniowości). Zwykle towarzyszy temu pojawienie się składowej stałej w odpowiedzi badanego obiektu – Dodatek 1/rys. 10. W przypadku sygnałów z niezerową składową stałą może pojawić się problem z wyznaczeniem czasu Tx (wzór (2)). W tej sytuacji należy skorzystać z metody przedstawionej w dodatku 2.

UWAGA

Składowa stała w sygnale wejściowym nie zmienia charakterystyki częstotliwościowej.

4 Przebieg ćwiczenia

1. Uruchomić program PicoScope_6. Ustawić parametry oscyloskopu zgodnie z rys. 5.

PicoScope 6					
Plik Edytuj Widoki Pomiary Narzędzia	Pomoc				
🕂 Л Ш Щ 🦻 🟠 📢 5 ms/div		<u> </u>	🔹 x1 🕨 📐	🥐 🔍 🔍 (🔍 🦻 🍭
A	🕻 Auto 👻 🕨 DC 👻	MY .	-		Technology
	/		,		50,0
⁸ sprzężenia	typ sprzężenia	<u>skala</u> <u>czasu</u>	skali czasu		40,0
6.0					30,0
Kanał A	Kanał B	Podstaw	a czasu		
					20,0
2,0					10,0
0,0					
-2,0					-10,0
-4,0					-20,0
-6,0					-30,0
-8,0	synchronizacja	3			-40,0
-10,0 -5,0 0,0 5,0	10,0 20,	0 25,0 3	0,0 35,0	40,0	45,0 x1.0
Running 🕨 📕 Układ wyzwalania 🛛 Auto	- A - X X	• 0 V • •	10 %	0 s 🕨	Pomiary

Rysunek 5: Ustawienia początkowe parametrów oscyloskopu

2. Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys. 6



Rysunek 6: Schemat blokowy układu do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych

- 3. Ustawić przełącznik w pozycji $-G_2;$ w tym przypadku identyfikowana będzie transmitancja $G_2.$
- 4. Włączyć negację sygnału w kanale B (Dodatek 4)
- 5. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
- 6. Włączyć zasilanie obiektu.
- 7. Włączyć zasilanie generatora.

Przyciskiem WAVE wybrać rodzaj przebiegu wyjściowego z generatora — przebieg sinusoidalny.

Ustawić częstotliwość na 50 Hz; wartość wprowadzamy z klawiatury, a następnie naciskamy przycisk z jednostką.

Ustawienia częstotliwości można również dokonać przy pomocy pokrętła i przycisków $\leftarrow \rightarrow$ w prawym górnym narożniku generatora.

Na monitorze pojawią się przebiegi sygnału z generatora (kanał \mathbf{A} – niebieski) i sygnału na wyjściu obiektu (kanał \mathbf{B} – czerwony).

UWAGA

Jeśli w trakcie pomiarów przebiegi nie będą sinusoidalne należy poprosić prowadzącego.

- 8. Przy pomocy pokrętła AMPL w dolnej części generatora ustawić amplitudę sygnału z generatora na wartość 9 \div 10 V odczyt z oscylogramu.
- 9. Nacisnąć przycisk STOP (czerwony kwadrat) w lewym dolnym narożniku okna oscylogramu.

Następnie umieścić na oscylogramie poziome linie pomocnicze (rysowanie linii: Dodatek 3).

Przesunąć linie tak aby przechodziły przez maksima i minima sygnału na wyjściu obiektu-rys. 7.



Rysunek 7: Ustawienia poziomych linii pomocniczych

10. Odczytać wartości między
szczytowe obu sygnałów (kolumna Δ w tabelce na oscylogramie).

Wynik zapisać w tabeli 1 – kolumny $2A_1$ i $2A_2$.

- 11. Umieścić na oscylogramie pionowe linie w punktach, w których narastające zbocza sygnałów osiągają wartość 0. W celu zwiększenia precyzji ustawienia linii należy powiększyć wybrany fragment oscylogramu (zmiana mnożnika skali czasu rolka myszy) rys. 8.
- 12. Odczytać czas pomiędzy liniami (wielkość Δ w tabelce na oscylogramie). Wynik zapisać w tabeli1-kolumna TX1.
- 13. Powtórzyć pomiar czasu dla linii umieszczonych na opadających zboczach sygnałów. Wynik zapisać w tabeli 1 kolumna TX2.
- 14. Ustawić mnożnik skali czasu na x1 (zmiana mnożnika skali czasu rolka myszy).



Rysunek 8: Ustawienia pionowych linii pomocniczych do pomiaru czasu opóźnienia

- 15. Nacisnąć przycisk START (zielona strzałka) w lewym dolnym narożniku okna oscylogramu.
- 16. Powtórzyć punkty od 9 do 16 dla wszystkich częstotliwości z tabeli 1
. $\ensuremath{\mathsf{UWAGA}}$
 - (a) **Skalę czasu (Rys. 5)** dobierać tak aby na oscylogramie widoczne były <u>3 lub 4</u> kolejne ekstrema sygnału z generatora.
 - (b) Dla częstotliwości **powyżej 100 Hz** ustawić **w obu kanałach** typ sprzężenia na AC
 - (c) Wyniki pomiarów na bieżąco wpisywać do programu Excel lub Matlab
- 17. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystyki Bodego obiektu o transmitancji G2
- 18. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie wyników pomiarów i ustawienie stałej czasowej dla transmitancji G_1 .
- 19. Ustawić przełącznik w pozycji G_1G_2 . Wyłączyć negację sygnału B (Dodatek 4)
- 20. Powtórzyć pomiary (punkty od 10 do 17) dla szeregowego połączenia transmitancji G_1 i $G_2.$
- 21. Wyłączyć zasilanie: generatora i obiektu.

Transmitancja G_2										
LP	Ustaw	vienia	Pomiary		Obliczenia				nia	
	f	$2A_1$	$2A_2$	T_{X1}	T_{X2}	T	$T_{X_{sr}}$	$ G(\omega) $	$\varphi(\omega)$	Uwagi
	[Hz]	[V]	[V]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[V/V]	[rad]	
1	5									
2	10									
3	20									
4	50									
5	100									
6	200									
7	500									
8	1k									
9	2k									
10	5k									
11	10k									
12	20k									
13	50k									
14	100k									
15	200k									
$\mathbf{Transmitancja}\ G_1 \ \mathrm{i}\ G_2$										
1	5									
2	10									
3	20									
4	50									
5	100									
6	200									
7	500									
8	1k									
9	2k									
10	5k									
11	10k									
12	20k									
13	50k									
14	100k									
15	200k									

Sprawozdanie

Do obliczeń i tworzenia wykresów wykorzystać program Matlab lub Excel.

- 1. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego obiektu o transmitancji G2
- 2. Na podstawie uzyskanych w punkcie 1 charakterystyk określić jaki to jest obiekt. Podać transmitancję i wyznaczyć parametry. Wartości parametrów należy określić na podstawie charakterystyk asymptotycznych dorysowanych na wykresach wyznaczonych charakterystyk logarytmicznych.
- 3. Na podstawie wykonanych pomiarów i obliczeń wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego obiektu złożonego z szeregowego połączenia transmitancji G_1 i G_2 .
- 4. Wiedząc że badany obiekt składa się z szeregowego połączenia dwóch bloków wyznaczyć charakterystyki Bodego bloku G_1 . Wskazówka: Należy od uzyskanych w punkcie 3 charakterystyk odjąć charakterystyki z punktu 1.
- 5. Na podstawie uzyskanych w punkcie 4 charakterystyk określić jaki to jest obiekt. Podać transmitancję i wyznaczyć parametry. Wartości parametrów należy określić na podstawie charakterystyk asymptotycznych dorysowanych na wykresach wyznaczonych charakterystyk logarytmicznych.
- 6. Podać transmitancję wypadkową obiektu. Na podstawie transmitancji wykreślić charakterystykę amplitudowo-fazową (Nyquist'a) i charakterystyki Bodego (na wspólnym rysunku z punktu 3. Określić czy otrzymane charakterystyki pokrywają się (jeśli nie to dlaczego)

Pytania dodatkowe dla dociekliwych:

- 1. Czy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych można użyć innego niż sinusoida sygnału wejściowego (np. przebieg prostokątny lub trapezoidalny)? Wskazówka: [1] – rozdział 3.3
- 2. Narysować schematy bloków G_1 i G_2 ; realizacja z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych
- 3. Na podstawie wykreślonych charakterystyk Bodego określić czy badany obiekt jest minimalnofazowy czy nieminimalnofazowy; odpowiedź uzasadnić [3].

Literatura

- [1] W. Findeisen: Technika regulacji automatycznej, PWN, Warszawa 1978.
- [2] Jerzy Pułaczewski: Podstawy regulacji automatycznej
- [3] Andrzej Markowski: Automatyka w pytaniach i odpowiedziach, Warszawa 1979, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne

Nasycenie

Zjawisko nasycenia ma miejsce wtedy, gdy po przekroczeniu przez sygnał wejściowy pewnej wartości ustaje przyrost sygnału wyjściowego. Analityczny opis jest wtedy następujący:



Rysunek 9: Wpływ nasycenia na kształt sygnału wyjściowego w zależności od wartości sygnału wejściowego. a) sygnał wejściowy w zakresie liniowym, b) sygnał wejściowy poza zakresem liniowym

Nieliniowość charakterystyki obiektu nie musi być symetryczna względem początku układu współrzędnych. Na rys 10 przedstawiono charakterystykę statyczną przetwornika pomiarowego ciśnienia z wyjściem prądowym. W tym przypadku sygnał wyjściowy przyjmuje wyłącznie wartości większe od zera z przedziału 4-20 mA. Dodatkowo zakres zmian sygnału wejściowego został ograniczony do wartości większych od zera.



Rysunek 10: Charakterystyka statyczna przetwornika pomiarowego z wyjściem prądowym 4-20 mA

Wyznaczanie przesunięcia fazowego w przypadku sygnałów z niezerową składową stałą

Pomiar czasu opóźnienia T_X wymaga precyzyjnego określenia momentów w których badane sygnały mają jednakowe fazy. Jeśli analizowane sygnały mają różne składowe stałe - jak na rys. 11 - może to być kłopotliwe. W takim przypadku do wyznaczenia czasu TX można skorzystać z zależności (6) – wyprowadzenie poniżej.



Rysunek 11: Wyznaczanie przesunięcia fazowego w przypadku sygnałów z niezerową składową stałą

Na podstawie rys. 11 można napisać układ równań (4):

$$\begin{cases} T_X + t_b = t_a + T_{X1} \\ T_X + t_a = t_b + T_{X2} \end{cases}$$
(4)

Dodając powyższe równania stronami otrzymujemy (5):

$$2T_X + t_a + t_b = T_{X1} + T_{X2} + t_b + t_a \tag{5}$$

Ostatecznie po przekształceniu otrzymujemy (6):

$$T_X = \frac{T_{X1} + T_{X2}}{2} \tag{6}$$

Jak widać wyznaczony czas T_X nie zależy od wartości składowych stałych przebiegów i przyjętego poziomu na którym dokonujemy pomiarów T_{X1} i T_{X2} (zielona linia na rys. 11). W praktyce ze względu na szumy pomiarowe najlepiej jest przyjąć poziom na którym dokonujemy pomiarów blisko miejsca w którym sygnały mają maksymalne stromości.

Umieszczanie linii pomocniczych na wykresie

Umieszczanie linii pomocniczych na wykresie Aby dodać linie pomocnicze na wykresie należy je "wyciągnąć" z narożników wykresu. W tym celu należy przemieścić kursor myszy nad odpowiedni kwadrat znajdujący się w narożniku wykresu, nacisnąć lewy przycisk myszy a następnie przemieścić linię w pożądane miejsce. Ustawienie linii pomocniczych skutkuje pojawieniem się dodatkowego okna z informacjami dotyczącymi ich położenia na wykresie.

Poszczególnym liniom pomocniczym odpowiadają różne miejsca z których należy je $wycią-gną\dot{c}:$

- Lewy, górny róg, niebieski kwadrat poziome linie dla kanału A
- Prawy, górny róg, czerwony kwadrat poziome linie dla kanału B
- Lewy, dolny róg, biały kwadrat pionowe linie dla czasu t



Linie na oscylogramie można dowolnie przesuwać. Aby wybrać linię która będzie przesuwana należy ustawić kursor w pobliżu wybranej linii i nacisnąć **lewy** przycisk myszy — linia przesunie się tak że będzie przechodzić przez aktualne położenie kursora. Następnie przesuwając kursor można precyzyjnie ustawić położenie linii.

Negacja sygnał wyjściowego

Poszczególne bloki badanego obiektu zostały zrealizowane w oparciu o wzmacniacze operacyjne pracujące w <u>konfiguracji odwracającej</u>, co oznacza że przed poszczególnymi transmitancją pojawia się znak '-'. Dla bloków połączonych szeregowo wypadkowa transmitancja jest równa iloczynowi transmitancji.

W przypadku parzystej liczby połączonych bloków minusy znoszą się; obserwowany na oscylogramie sygnał ma właściwą fazę.

Natomiast w przypadku nieparzystej liczby połączonych bloków sygnał wyjściowy jest zanegowany. W celu obserwacji właściwej wartości sygnału należy go ponownie zanegować wykorzystując możliwość wprowadzenia ujemnego mnożnika (oznaczenie 'x-1' na poniższym rysunku) w odpowiednim kanale pomiarowym oscyloskopu.

